

神戸大学工学部 正員 西村 昭
 神戸大学工学部 正員 宮本 文穂
 駒井鉄工所(株) 正員 〇長谷川 敏之

1. はじめに 近年、橋梁においては、自動車交通量の増大、重量車の増加などへの対応を迫られることと相まって、寿命はどの位かといったことが、健全度あるいは耐用性の評価法の確立という形で、重要な問題となっている。ところが、実構造物の健全度を正確に診断することは極めて困難であり、経験豊富な技術者によって始めて定性的な評価が可能になる程度である。そこで本研究では、技術者の経験に基づく評価をうまく生かすためにファジィ集合論の適用を試みる。すなわち、技術者の経験からの主観的評価を、ファジィ集合論を用いて総合化し、構造物の健全度診断に生かそうとするものである。

2. ファジィ集合論の構造健全度診断への適用法 まず、構造物の健全度のグレードを1~10の10段階に分類する。ここで1とは末期的な損傷状態を、10とは全く損傷がない状態を表わす。これらに対する技術者の健全度評価は、図1のように言語変数で行なわれ、グレードとの間は帰属度関数によって特性づけられる。

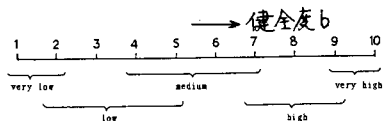


図1 健全度のグレード

すなわち、各要因の評価は、種々の試験より得られるデータを基に言語変数を用いて主観的に行なわれるが、ここで問題となるのは、各要因に対して言語変数の適合性が異なる可能性があることである。そこで本研究では、各要因に対する判定の確からしさを表わす指標を導入し、これを確度と定義する。確度は各要因について、専門的知識に基づいて、[0, 1]の範囲で経験的、主観的に決められるもので、元の帰属度にかき合わせることによって判定された健全度の修正されたファジィ集合が得られる。次に、構造物健全度評価の目的の主たるものが、余寿命の大小に応じて、補修、補強等の対策を樹立するための資料を得ることにあるのに注目して、各要因の評価を総合化する一つの方法として、構造物の余寿命を考慮した総合評価を行なうことを考える。そのため、健全度 b と余寿命 t との間のファジィ関係を定義する。構造物の設計寿命を T 年としたとき、 b と t とは両対数グラフ上で直線関係にあると仮定し、さらにこれらの関係のあいまいさを表現するために、対数正規分布形の核でファジィ化する。平均値のとき、帰属度1をとるように変換したものが式(1)であり、この関係を示したものが図2である。

$$m_b(b, t) = \frac{1}{\sigma} \exp \left[\lambda_b - \frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \lambda_b}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (1)$$

ここで $\lambda_b = \ln(b^{\log T})$

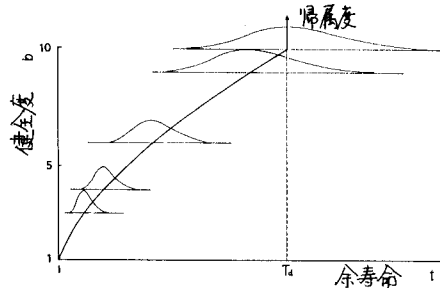


図2 健全度 b と余寿命 t とのファジィ関係

次に、健全度 B と余寿命 T をファジィ関係 R を用いて式(2)によって、ファジィ合成することにより関連づける。このとき、 T の帰属度関数は式(3)で与えられる。

$$T = R \circ B \quad (2) \quad m_T(t) = \max_b \min \{ m_b(b), m_R(b, t) \} \quad (3)$$

上式により得られた各要因ごとの余寿命 T_i に対する評価を総合化し、構造物全体としての相対的余寿命の推定を行なう。ファジィ集合で与えられた評価を総合化する手法として、和集合と積集合があるが、ここでは全体的評価に注目するため、和集合を用いる。和集合は式(4)のように表わされる。

$$T_T = \bigcup T_i, \quad m_{T_T}(t) = \max [m_{T_i}(t)] \quad (4)$$

上式で与えられる余寿命のファジィ集合分布形より、各構造物の耐用性を比較することが可能となる。しかし、実構造物を対象とする場合、この方法だけでは相対的評価が容易ではないと考えられる。そこで、本研究では、あいまいな対象を主観

的に計量するのに好都合なファジィ積分¹⁾を用いる。ファジィ積分は確率測度の拡張であるファジィ測度 g_n を用いて実行され、ファジィ分布関数 $H(r)$ と g_n の関係は式(5)のように定義される。

$$H(r) = g_n + H(r_{n-1}) + \lambda \cdot g_n \cdot H(r_{n-1}), \quad H(r_1) = g_1 \quad (\text{ただし } 0 \leq H(r_1) \leq \dots \leq H(r_n) = 1) \quad (5)$$

また区間 $[0, 1]$ の値域をもつ関数を $h(r)$ とすると、ファジィ積分は式(6)で定義される。

$$f(h(r_1), g_1) = \bigvee_{i=1}^n [h(r_i) \wedge H(r_i)] \quad (6)$$

3、道路橋RC床版への適用例 以上の手法に従って、近時耐用性診断が必要とされる機会の多い鉄筋コンクリート床版(

RC床版)をとりあげて数値計算例を示す。その際必要なデータとして、神戸大学西村研究室で得た実験結果²⁾を用いる。それぞれの床版に対する各要因の評価を言語変数で与えたものを表1に示す。この評価を先に示した手法にあてはめることによって、技術者の経験を生かした耐用性判定が可能となる。この場合の確度は過去の実験より表2のように表わされ、これを数値化したものを表3に示す。また、健全度と余寿命のファジィ関係としては、式(1)において $\alpha = 0.2$ 、 $T_d = 50$ (年)とおいたものを用いる。

一例として、薬師橋床版において得られた余寿命に対するファジィ集合を図3に示す。さらに定量的な評価値を得るためにファジィ積分を適用する。ファジィ積分を実行するにあたり、総合評価を表わすファジィ集合の余寿命をを離散的にとることを考える。ただし、ファジィ関係を対数正規型の帰属度関数で仮定したため、自然対数軸上で考える必要がある。余寿命90年までで等間隔に16点をサンプリングして、各要素における帰属度をファジィ測度とし、また、これをRC床版の健全さの度合いを表わす帰属度関数と考える。これらを用いてファジィ積分を実行した結果を表4に示す。さらに、これらのRC床版の健全度がどの程度なのかを知るための指標として、全判定要因の評価が同じである5つの場合についての評価値も同時に示す。表4より、実橋床版については、各実橋測定当時の健全度の評価と対応した評価を下していることから妥当な判定法であるといえる。さらに、経験豊富な技術者の主観的評価を生かせるなどのファジィ集合論を用いる利点を考え合わせると、より現実的な判定法であると考えられる。

4、結び 本研究のまとめとして、1) 橋梁の耐用性診断にファジィ集合論を適用することにより、これまで問題とされていた"主観性に基づくあいまいさ"の処理が可能となる。2) 確度な変量を導入することにより、各要因の特性を総合評価にうまく組み込むことができる。(共同研究者: 友田 研也, 高田機工(株))

参考文献

- 1) 菅野道夫: Fuzzy測度とFuzzy積分, 計測自動制御学会論文集, 1972, pp. 218~226
- 2) 山本晃久, 西村昭, 宮本文徳: 道路橋RC床版の耐用性判定の定量化について, 土木学会第37回年次学術講演会講演概要集第5部, 1982.10

表1 言語変数による各要因別の評価

要因	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
Model-1	VH	VH	VH	VH	VH	VH	VH	VH
Model-2	M	M	VL	M	M	L	M	M
Model-3	VL	VL	VL	L	VL	VL	VL	VL
田村橋(橋脚部)	H	H	M	VH	—	H	H	H
田村No2(橋脚部)	M	IL	M	M	—	M	M	L
田村No4(橋脚部)	M	M	L	VH	—	M	M	M
田村No4(橋脚部)	M	M	L	M	—	L	L	L
薬師橋	L	L	L	M	M	M	M	M
箱橋橋	M	M	M	H	M	M	M	M
田村橋	M	M	M	M	M	M	M	M

ここに VH: very high H: high
M: medium
VL: very low L: low

表2 RC床版の診断に用いる要因

要因	方法	対象と特性状	判定の特性
X1	目視観察	ひびわれ状況	裂石の発生の場合に確度高い
X2	"	ひびわれ深度	深い側に確度低い
X3	動荷重試験	ひびわれ深さ	全線に確度中位(両端に確度高い)
X4	"	たわみ指標	全線に確度高い
X5	"	歪曲率特性	全線に確度中位, 深い側に確度高い
X6	"	最大加速度	全線に確度中位
X7	"	血圧差	全線に確度低い
X8	"	振動変数	深い側に確度高い

表3 RC床版の診断に用いる要因ごとの評価の確度

要因	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
very high	1.0	1.0	0.8	0.8	0.6	0.6	0.3	0.5
high	0.3	0.6	0.5	0.8	0.5	0.5	0.3	0.3
medium	0.3	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.3	0.3
low	0.3	0.4	0.6	0.8	0.6	0.5	0.3	0.6
very low	0.8	0.4	0.8	0.8	0.8	0.6	0.3	0.8

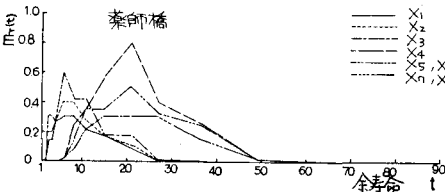


図3 余寿命と要素とするファジィ集合(薬師橋)

表4 ファジィ積分の結果および基準評価値との比較

対象床版の評価	基準評価
Model-1	基準A(全評価) 0.80
田村No2(作成直後)	基準B(全評価) 0.73
箱橋橋	
田村No4(作成直後)	基準C(全評価) 0.60
田村橋	
田村No2(補修前)	
薬師橋	
田村No4(補修前)	
Model-2	基準D(全評価) 0.46
Model-3	基準E(全評価) 0.22